第46卷 第7期
2023年7月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 7
Jul. 2023

基于多时相遥感数据的乌鲁木齐市生态安全格局构建

田柳兰[1]， 王珊珊[2]， 毋兆鹏[1,3]

（1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院，新疆 乌鲁木齐 830054；2. 新疆艺术学院附属中等艺术学校，新疆 乌鲁木齐 830023；3. 新疆干旱区湖泊环境与资源实验室，新疆 乌鲁木齐 830054）

摘 要：构建生态安全格局可促进区域生态发展，对于生态脆弱区的环境改善显得尤为重要。以乌鲁木齐市2000、2010年和2020年3期土地利用数据为基础，通过生态系统服务重要性和生态敏感性评价识别了生态源地，借助最小累积阻力（MCR）模型提取了生态廊道，利用电路理论确定了生态夹点，最终采用阻力阈值法构建了生态安全空间并明确了高警戒修复区。结果表明：(1) 近20 a，生态源地面积呈增加趋势，共计445.63 km^2，占比增加3.19%，新增生态源地主要分布于研究区西南和东部的乌鲁木齐县和达坂城区。(2) 识别3期生态廊道总数分别为27条、30条和40条，总长度分别为870.42 km、1115.83 km和1277.12 km。(3) 近20 a，研究区5个等级生态安全空间分布具有不均衡性。高生态安全空间集中分布于研究区东北部和西南部，较高生态安全空间集中分布于高生态安全空间外围，且相对集中于中部，二者空间分布呈持续扩张趋势。中等生态安全的空间分布呈西北—东南走向条带状，较低态安全空间集中分布于研究区西北部及东南部，低生态安全空间则主要集中分布于北部，且在南部有较少分布，三者空间分布皆呈不断减少趋势。(4) 研究区生态夹点7个，高警戒修复区188.17 km^2，修复后最大累积电流由值4.75 A降至3.82 A。

关 键 词：多时相遥感数据；最小累积阻力模型；电路理论；生态安全格局；乌鲁木齐市

文章编号：1000－6060(2023)07－1155－11(1155～1165)

十九大报告提出“加大生态系统保护力度，优化生态安全屏障”的重要理念，使得保障生态安全已成为社会的迫切需要和研究热点[1]。生态安全由环境安全理论衍生而来，并最早由国际应用系统分析研究所（IASA）首次提出，目的是保障人类生活健康的基本权利[2]。其中，由于不合理利用资源导致生态脆弱区的景观破碎化现象十分严重，而通过廊道和节点连接破碎生境的生态网络，对于维护整个区域的生态安全具有重要意义[3]。因此，构建科学、合理的生态保护格局对保障区域生态安全具有基础作用，也是国土空间总体规划中应重点关注的问题[4]。

近年来，学者们对生态安全格局的研究从概念、构建方法、生态源与生态廊道的识别、生态恢复与重建等方面，进行了广泛的探索与研究。同时，以国土空间生态修复为目标的生态安全格局构建也已成为最新的研究热点。如Yu[5]首次引入景观生态安全格局概念；蒙吉军等[6]基于最小累积阻力（MCR）模型构建了土地利用生态安全格局；薛强等[7]基于电路理论识别出生态夹点，并对生态障碍点进行修复与重建；付凤杰等[8]基于生态安全格局进行国土空间生态修复关键区识别，并对其进行修复与优化。另外，还有学者针对典型生态环境区域，从景观生态[9-11]、生态承载力[12]、生态足迹[13-15]及生态安全指数评价体系[16-17]等不同角度对生态安全格局构建进行不同层次的研究。然而，在当前研究中，基于生态过程探讨廊道和网络的结构、功能及边缘效应的研究尚显不足，尤其是对构建完生态廊道

收稿日期：2022-09-20； **修订日期**：2022-10-25

基金项目：新疆维吾尔自治区高校科研基金项目（XJEDU2021I021）；国家自然科学基金项目（41761113）资助

作者简介：田柳兰（1996-），女，硕士研究生，主要从事空间信息分析与应用研究. E-mail: 2548994134@qq.com

通讯作者：毋兆鹏（1976-），男，博士，教授，主要从事3S技术与绿洲资源开发研究. E-mail: wuzhaopengxj@sina.com

后，对包括修复关键区域识别在内的细化研究需进一步加强。在研究对象的选取中，主要集中于经济发展水平较高的城市群和都市带[18]，而针对干旱区绿洲城市生态安全格局的研究相对较少。

乌鲁木齐市作为新疆的政治、经济和文化中心，属典型干旱区绿洲城市。由于地形地质条件限制及水土资源空间分布不平衡，使得在工业化、城市化快速发展中，已无法按照"以水定地"原则实现耕地占补平衡。局部地区土地退化和土地污染现象较为严重，区域农业发展、生态保护与城市化发展之间的矛盾日益尖锐，分析生态安全格局的时空演变已成为当前亟待解决的问题之一[19]。本文基于"生态源地识别-阻力面构建-生态廊道提取"的思路，通过开展生态系统服务重要性和生态环境敏感性评价，识别乌鲁木齐市生态安全重要区域。利用MCR模型提取生态廊道，结合生态环境特点确定实际生态廊道。基于电路理论，结合累积阻力表面识别研究区生态夹点，构建符合乌鲁木齐市生态系统健康和社会经济可持续发展需求的生态安全格局，为有效协调经济发展和生态保护之间的矛盾关系，优化生态文明建设背景下的国土空间总体规划提供科学依据和有力支撑。

1 研究区概况

乌鲁木齐市(86°46′10″~88°59′48″E，42°54′16″~44°58′16″N)地处亚欧大陆中心，位于新疆天山中段北麓、准噶尔盆地南缘。区域东、西、南三面环山，地势由南向北逐渐降低，依次为山地、山间盆地或丘陵、平原。全市辖7区1县(天山区、沙依巴克区、新市区、水磨沟区、头屯河区、米东区、达坂城区、乌鲁木齐县)，总面积1.42×10⁴ km²。该区域属于中温带大陆性干旱气候，昼夜温差大，年平均气温7.4 ℃，年平均降水量27.9 mm。河流均为内流河，以冰雪融水补给为主，河道短且分散，主要河流有乌鲁木齐河、头屯河、白杨河、大河沿河(图1)。

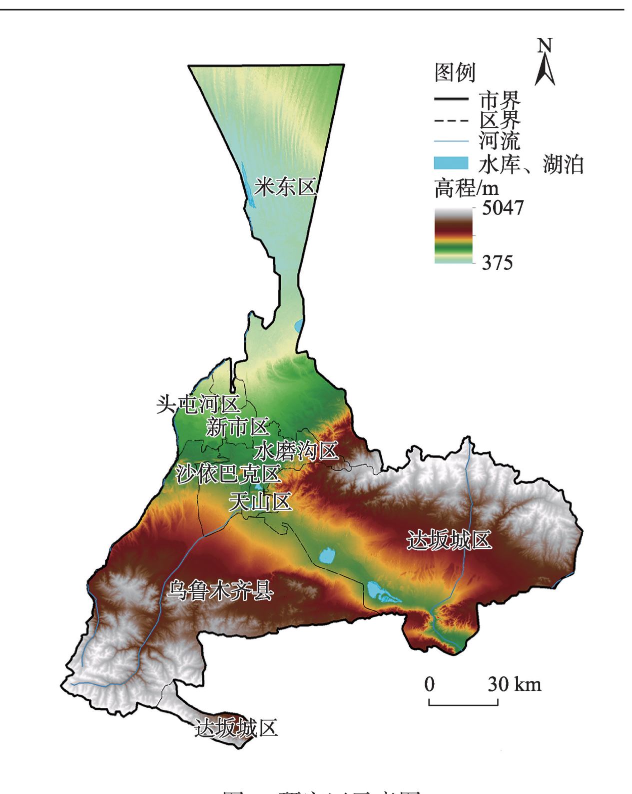


图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

2 数据与方法

2.1 数据来源及预处理

研究所选取的2000年9月(Landsat-5 TM)、2010年8月(Landsat-5 TM)及2020年8月(Landsat-8 OLI)3期遥感影像数据，云量均小于5%。选用分辨率为30 m的数字高程模型(DEM)数据筛选生态源地，并通过ArcGIS 10.5进行填挖处理。上述Landsat数据和DEM数据，均来源于地理空间数据云网站(http://www.gscloud.cn/)。基于ENVI 5.3，完成对影像的分幅拼接、大气校正、辐射校正及几何校正等预处理。根据《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017)，结合乌鲁木齐市土地利用规划及现状，运用随机森林分类器提取研究区耕地、水域、林地、草地、建设用地和未利用地6类土地利用类型，3期分类结果的Kappa值分别为0.89、0.89、0.88，精度分别为90.63%、90.53%和90.24%，均满足研究所需分析要求。

2.2 研究方法

2.2.1 生态源地识别 生态源地通常指生境质量较高的区域，对维护区域生态安全和可持续发展具有重要意义[20]。本文依据环保部印发《2015年生态保护红线划定技术指南》，确定生态系统服务重要性和生态敏感性2项评估指标作为评价要素层，采用AHP层次分析法确定生态用地评价因子及权重(表1)。

在此基础上，提取2项评价结果中综合指数最高的作为核心型生态用地，景观斑块连接度用于分析源地中连通性较好的区域。借助ArcGIS 10.5以

表1　生态用地评价因子及权重

Tab. 1　Evaluation indices and weights of ecological land

决策目标	评价因素层	指标层	参评因子	全局权重
生态用地评价	生态系统服务重要性评价	生物多样性保护	植被覆盖度	0.0149
			降雨量与气温	0.0238
			净初级生产力	0.0425
			高程	0.0112
		水资源	距水库、湖泊距离	0.1039
			距五级河流距离	0.1039
		地形	地形位指数	0.0975
			坡向	0.0488
		人类活动干扰	距建设用地距离	0.0357
			人口聚集度	0.0178
	生态敏感性评价	水土流失	土地利用	0.0282
			降雨量	0.0445
			地形起伏度	0.1735
			土壤质地	0.0184
			植被覆盖度	0.1103
		土壤侵蚀	坡长坡度	0.0061
			水土保持措施	0.0368
			降雨侵蚀力	0.0094
			土壤可蚀性	0.0148
			植被覆盖与管理	0.0578

及Conefor Sensinode 2.6软件，对概率连接度指数和斑块重要性指数进行计算[21]，最终完成源地识别。其计算公式为：

$$PC=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}P_{ij}^{*}\times a_i\times a_j}{A_L^2}\qquad(1)$$

式中：PC为某一斑块在研究区景观中的概率连接度指数；P_{ij}^{*}为斑块i与斑块j之间全部路径概率的乘积最大值；a_i、a_j分别为i斑块和j斑块的面积(km²)；A_L为研究区景观的总面积(km²)。

$$d_{PC}=\frac{PC-PC_{remove}}{PC}\times 100\%\qquad(2)$$

式中：d_{PC}为斑块的重要性；PC为某一斑块在研究区景观中的概率连接指数；PC_{remove}为去除该斑块后的可能连接度指数。

本文选取面积大于10 km²的生境斑块，斑块连通性的关键性阈值设定为2500 m，概率连接度指数设定为0.5，斑块重要性指数设定为≥0.2，最终提取出2000、2010年和2020年的生态源地分别为14个、15个和18个。

2.2.2　MCR模型　MCR模型最早由Knaapen等[22]提出，主要用于汇集生态源地、阻力值、运动路径距离来模拟生态过程发生的空间规律。物种在景观中迁移与扩散均需要耗费一定的成本，由于生态过程倾向于发生在最小阻力路径中，最小耗费距离就是利用物质流穿过景观时的阻力系数修正后的直线距离，从而通过确定源与目标之间的最小累积阻力路径完成生态廊道识别。其计算公式为：

$$MCR=f_{min}\sum_{j=n}^{i=m}D_{ij}\times R_i\qquad(3)$$

式中：MCR为最小累积阻力值；f_{min}为某点到基面最小累积阻力与生态过程的正相关关系；D_{ij}为生态用地从源i到j的空间距离；R_i为栅格i对生态源地扩张的阻力系数；Σ为栅格i与源j之间穿越所有单元的距离和阻力的累积。

2.2.3　重要廊道识别　为探究生态廊道的重要程度，利用重力模型，区分普通廊道和重要廊道，构建层次性生态廊道网络[20]。其计算公式为：

$$G_{ab}=\frac{N_aN_b}{D_{ab}^2}=\frac{\left[\frac{1}{p_a}\times\ln(S_a)\right]\left[\frac{1}{p_b}\times\ln(S_b)\right]}{\left(\frac{L_{ab}}{L_{max}}\right)^2}=\frac{L_{max}^2\ln(S_a)\ln(S_b)}{L_{ab}^2P_aP_b}\qquad(4)$$

式中：G_{ab}为生态源地a和b之间的相互作用力；N_a、N_b

分别为斑块 a、b 的权重值；D_{ab} 为 a、b 两斑块间潜在廊道阻力的标准化值；P_a、P_b 为斑块 a、b 的阻力值；S_a、S_b 分别为斑块 a、b 的面积（km^2）；L_{ab} 为斑块 a、b 之间廊道的累积阻力值；L_{max} 为研究区中所有廊道累积阻力的最大值。

2.2.4 生态夹点识别 生态夹点作为源地间连接的活跃区域，是防止生态退化，保证生态廊道流通的重要节点，需要优先改善和保护，由McRae等[23]基于电路理论提出。基本思路是，借助电阻值反映物种迁移扩散时面临的生态阻力大小，使用电流和电压量化分析生态源地之间的连通性。电流代表物种或基因型的迁移数量和概率，电压代表源地间的内部差异性。将生境质量较好的斑块视为节点替代生态源地，生境质量越高、越有利于物种迁移，节点间的电流值也就越大。在此过程中，电流密度可用来识别廊道中的夹点地区，它被定义为通过单个像元的电流大小。生态夹点作为生态廊道中电流密度较高的区域，表明物种在栖息地间运动通过该区域的可能性比较高，或者没有其他可以选择的替代路径。如果移除或者改变，将会对链接度产生较大影响。本文"生态夹点"的识别，主要利用Linkage Mapper插件中的Pinchpoint Mapper工具完成。

3 结果与分析

3.1 生态源地时空分布特征

2000—2020年乌鲁木齐市生态源地空间分布相对稳定，主要集中于乌鲁木齐县的托里乡、萨尔达坂乡、庙尔沟乡、达坂城区的阿克苏乡及米东区南部，这些区域受地形条件限制地势较高、植被覆盖度高、林草地广布、人类开发建设少，是生态系统服务极重要区和生态极敏感区，需要重点保护（图2）。

从源地数量来看，2000—2020年生态源地面积不断增加，由2000年的2640.35 km^2增加至2010年的2882.54 km^2，后又增加至2020年的3085.98 km^2，共增加了445.63 km^2。占比也由2000年和2010年的18.94%和20.67%，增加至22.13%，增幅为3.19%（表2）。源地数量的持续增加，主要得益于《乌鲁木齐市城市总体规划（2000—2020年）》中依法加强了绿化用地管理。同时，相关鼓励社会力量承建荒山绿化，并对宜林荒山荒地造林给予补助等生态修复工程的政策也得到了有效落实。

表2 2000—2020年生态源地面积统计结果

Tab. 2 Statistical results of ecological source areas from 2000 to 2020

年份	面积/km^2	占比/%
2000	2640.35	18.94
2010	2882.54	20.67
2020	3085.98	22.13

3.2 最小累积阻力面构建

阻力面的构建，已成为研究物种迁移与扩散过程中克服阻力的基本内容[24]。参考张萌等[25]结果，结合研究区实际，选取坡度、土地利用类型、植被覆盖度及高程4项阻力因子，对相对阻力系数进行赋值，利用专家打分法确定各阻力因子权重（表3），构建研究区生态阻力指标体系。

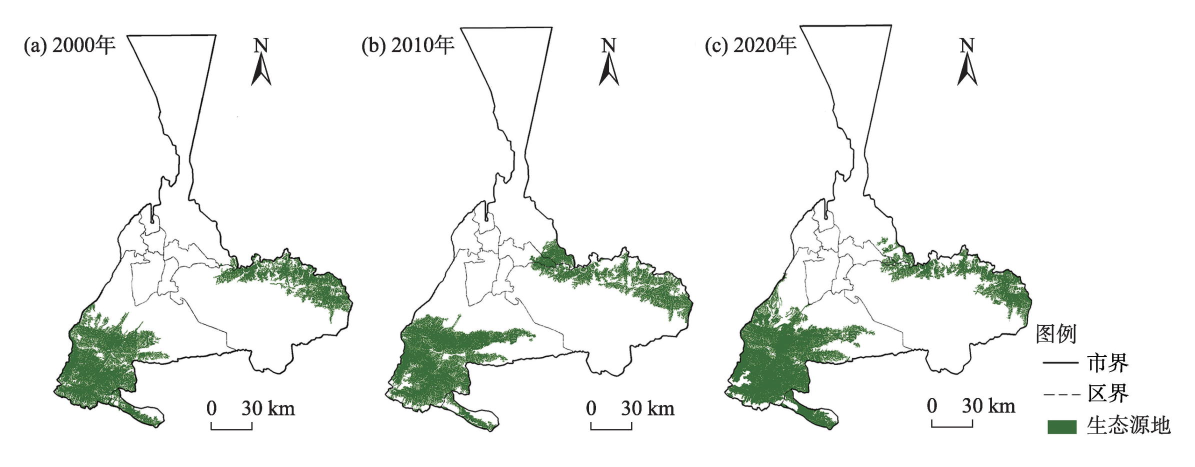


图2 2000—2020年生态源地分布

Fig. 2 Distributions of ecological sources from 2000 to 2020

表3 生态阻力指标体系及分级标准权重

Tab. 3 Index system of ecological resistance and weight of classification standard

阻力因子	相对阻力系数						权重
	1	2	3	4	5	6	
坡度/(°)	≤2	(2, 6]	(6, 15]	(15, 20]	(20, 25]	>25	0.14
土地利用类型	林地	草地	耕地	水体	建设用地	未利用地	0.52
植被覆盖度	>0.79	(0.67, 0.79]	(0.56, 0.67]	(0.47, 0.56]	(0.41, 0.47]	≤0.41	0.18
高程/m	>4000	(3000, 4000]	(2000, 3000]	(1000, 2000]	(500, 1000]	≤500	0.16

综合表3中的阻力因子，运用“综合加权指数和法”和MCR模型完成研究区最小累积阻力面构建(图3)。结果显示，随着源地向外扩张，20 a间阻力值逐渐增大，尤其是低阻力区扩张明显，主要分布在研究区西南、东南部的山地丘陵区，植被覆盖度较高，地形起伏度较大。中高阻力区则呈萎缩趋势，主要分布于研究区北部、中部以及南部的平原区，建设用地和耕地分布较为集中，人类活动强度较大。

3.3 生态廊道时空分布特征

由于生态廊道网络间存在因共享同一斑块而形成的冗余，因此需要根据不同廊道的最小阻力值对其予以剔除。最终，基于2000年14个斑块、2010年15个斑块、2020年18个斑块，提取3期生态廊道的总数分别为27条、30条和40条，并借助重力模型计算核心斑块间的相互作用力，分别提取相互作用力大于10、50、30的廊道11条、12条、15条为重要廊道，总长度分别为870.42 km、1115.83 km、1277.12 km(图4)。生态廊道数量的增加，有效说明研究区内生态流被截留和分割的概率大大减少，对其周围形成的各种辐射区内环境的改善极为有利，这与研究区生态源地数量的不断增加形成了较好的相互印证。

从总体分布格局来看，2000年生态廊道在中部地区分布较为狭窄，源地之间的联系集中在乌鲁木齐县和达坂城区。2010年生态廊道的分布相较于2000年而言，在中部区域较为稀疏，西南部区域较为密集，源地之间的联系集中分布于乌鲁木齐县、达坂城区和天山区。其中，达坂城区内廊道分布格局更加广泛。这是由于新增生态源地以天然牧场和森林为主，且主要分布于乌鲁木齐县、达坂城区、水磨沟区西部和米东区南部，从而加深了西南部各源地之间的密切联系。2020年生态廊道分布格局较为均匀，源地的联系集中于乌鲁木齐县、达坂城区、天山区、沙依巴克区和水磨沟区之间。与2010年相比，乌鲁木齐县新增生态源地面积显著增加，且呈现明显向北部延伸的趋势。综上，近20 a研究区廊道的增加，有效实现了各源地间物种的迁移与能量的流动，所形成的生态网络，对维护研究区生态系统的稳定性和提高生态服务价值作用明显。

3.4 生态安全格局

基于2000—2020年3期最小累积阻力面，利用

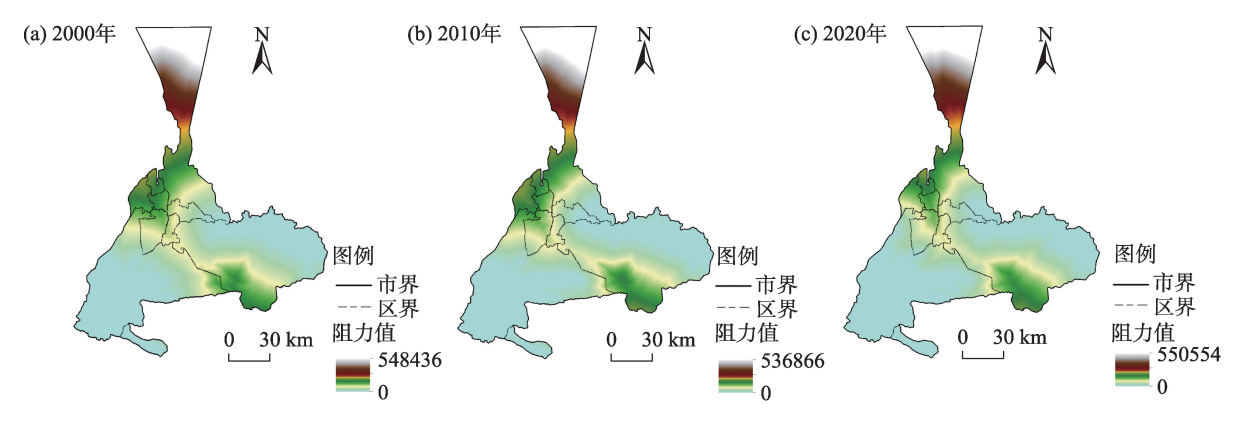


图3 2000—2020年最小累积阻力面

Fig. 3 Minimum cumulative resistance surface from 2000 to 2020

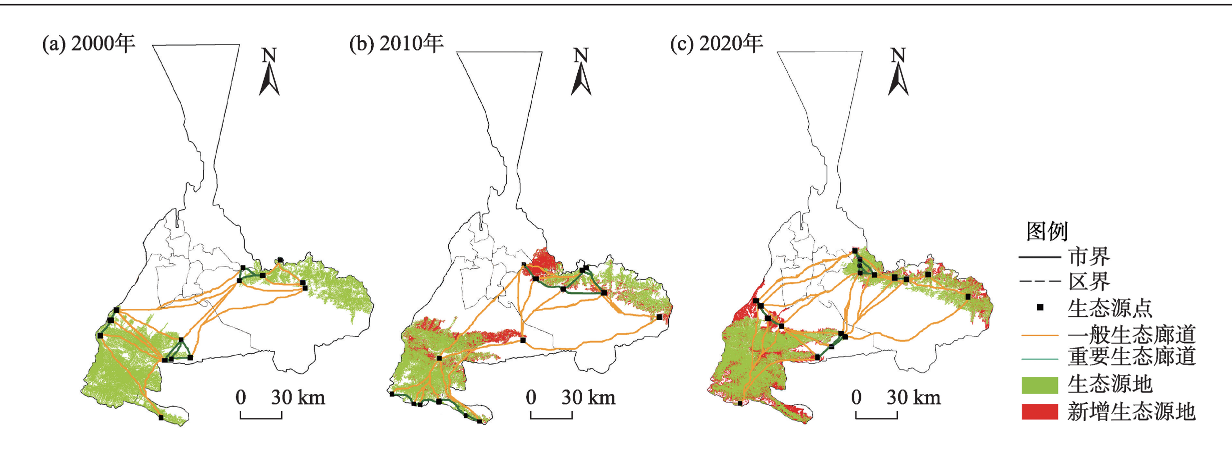


图4 2000—2020生态廊道及新增生态源地分布

Fig. 4 Distributions of ecological corridors and new ecological source sites from 2000 to 2020

GIS软件统计最小累积阻力值与栅格面积之间的关系，并将阻力值的拐点作为临界点，经离散分级后构建出5级生态安全空间，即高生态安全空间、较高生态安全空间、中等生态安全空间、较低生态安全空间和低生态安全空间。与此同时，鉴于一定宽度的生态廊道与生态源地应具有同等重要性，理应成为生态安全格局的重要组成部分[26]。因此，将重要生态廊道200 m缓冲区和一般生态廊道100 m缓冲区，纳入高生态安全空间之中，最终完成研究区2000—2020年生态安全空间格局构建(图5)。

结果表明，近20 a间5个级别生态安全空间分布具有不均衡性。高生态安全空间集中分布于研究区东北部和西南部，较高生态安全空间集中分布于高生态安全空间外围，且相对集中于中部。近20 a间，高、较高生态安全空间空间格局均呈现扩张趋势，二者总占比由2000年的46.10%上升至2020年的51.80%(图6)，这也说明研究期内整体生态安全水平不断提高，生态环境得到进一步改善。中等生态安全的空间分布呈西北—东南走向的条带状，且集中于研究区中部较高生态安全空间外围。较低生态安全空间集中分布于研究区西北部及东南部，低生态安全空间则主要集中分布于北部，且在南部有较少分布。近20 a间，中、较低及低生态安全空间三者整体呈现出逐年减少趋势，总占比由2000年的54.90%减少至2020年的48.20%。但自2010年后，较低和低水平生态安全空间减少趋势逐渐放缓。由于生态安全由众多因素构成，其对人类生存和发展的满足程度各不相同，因此，生态安全也只能是一种相对安全，而没有绝对安全[27]。就研究区而言，近20 a区域内以高、较高生态安全空间分布为主，且占比呈现逐年增加趋势，可以说明研究区生态安全格局不断向好，生态保护政策的实施效果突

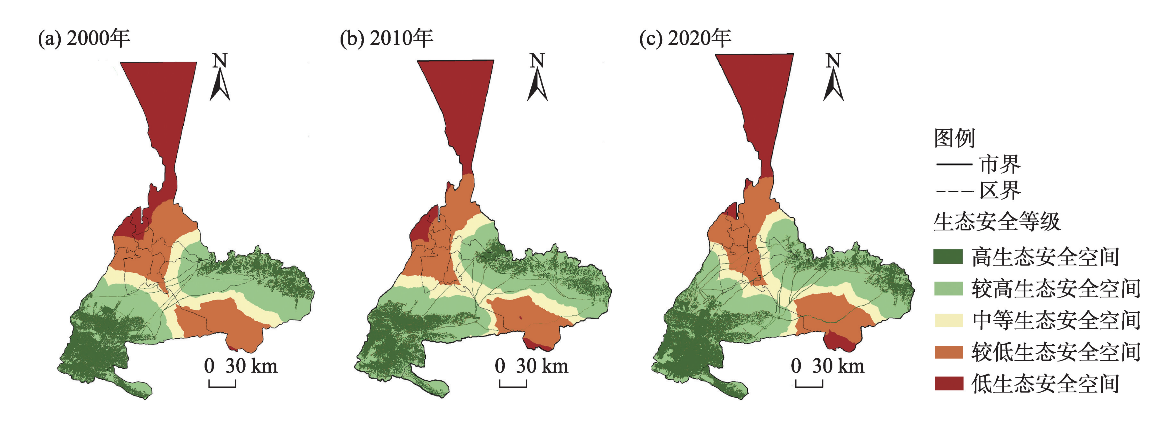


图5 2000—2020年生态安全格局空间分布

Fig. 5 Spatial distributions of ecological security pattern from 2000 to 2020

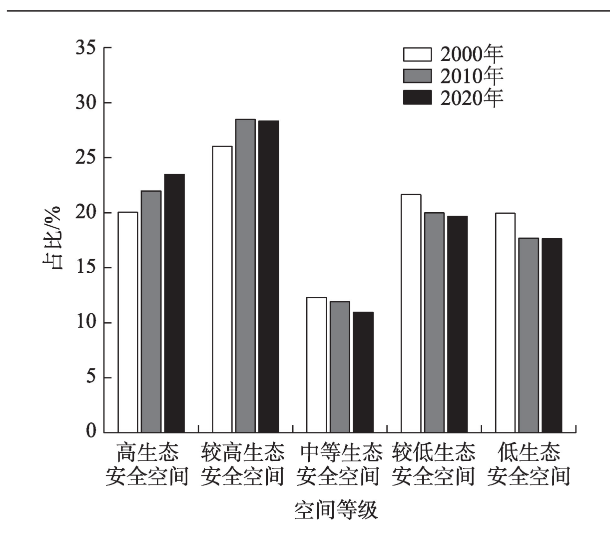


图6 2000—2020年生态安全空间等级变化

Fig. 6 Change of ecological security space grade from 2000 to 2020

显，但仍需继续严格执行。

3.5 生态夹点与高警戒生态修复区

根据生态廊道的电流密度空间分布(图7a)，结合自然断点法并进行阻力面叠加，共提取生态夹点7个(图7a)，在空间上主要分布于乌鲁木齐市中部地区。其中，达坂城区3个，乌鲁木齐县2个，沙依巴克区1个，水磨沟区1个。将提取的2020年研究区廊道和夹点分布结果，与土地利用现状斑块进行空间叠加分析，包含廊道和夹点的斑块首先被确定为生态空间关键区域，即被退化的概率较大。在此基础上，利用Barrier Mapper工具，对上述生态空间关键区进行清除(修复)，通过对比修复前后其廊道连通性的累积电流值，确定出需要重点关注的高警戒修复区。即累积电流值越大，该区域对景观连通性的造成的障碍就越大，被修复的紧迫性就越大。根据得到的廊道连通性累积电流值空间分布，识别出高警戒修复区188.17 km^2(图7a)，其在空间分布上较为分散。其中，乌鲁木齐县北部、达坂城区东部和西部分布较多，天山区、沙依巴克区、水磨沟区分布相对较少。进一步计算高警戒区修复后流经区域的累积电流值，结果显示恢复区间为0.55~1.47 A(图7b)，修复后最大累积电流值由4.75 A降至3.82 A。

3.6 生态安全保护策略

根据对乌鲁木齐市生态安全空间的构建及结果分析，为进一步优化乌鲁木齐市生态格局，提出以下生态安全保护策略：

(1) 应对已有生态源地加强保护，使其处于自然发展状态，为此须在规划时就将其设为禁止开发区域。乌鲁木齐市作为干旱区典型绿洲城市，其生态“源地”重点既应包括一号冰川、乌拉泊、头屯河、照壁山等水库在内的河流发源地、水源涵养区及保护区，也应包括研究区内各高山森林草地保育区。与此同时，对非法侵占和开发“源地”的行为要进行追责。城市的开发和规划也需同步对受损的生态“源地”进行整治和修复。

(2) 对于生态廊道而言，要优化头屯河、乌鲁木齐河、水磨河、白杨河4条河流廊道，注重其连通城市上下游的生态环境建设与保护，沿河结合土地开发建设小型绿地、大型公园、绿化山坡等，保持高绿化率。对包括诸如河滩路和乌昌大道等在内，靠近

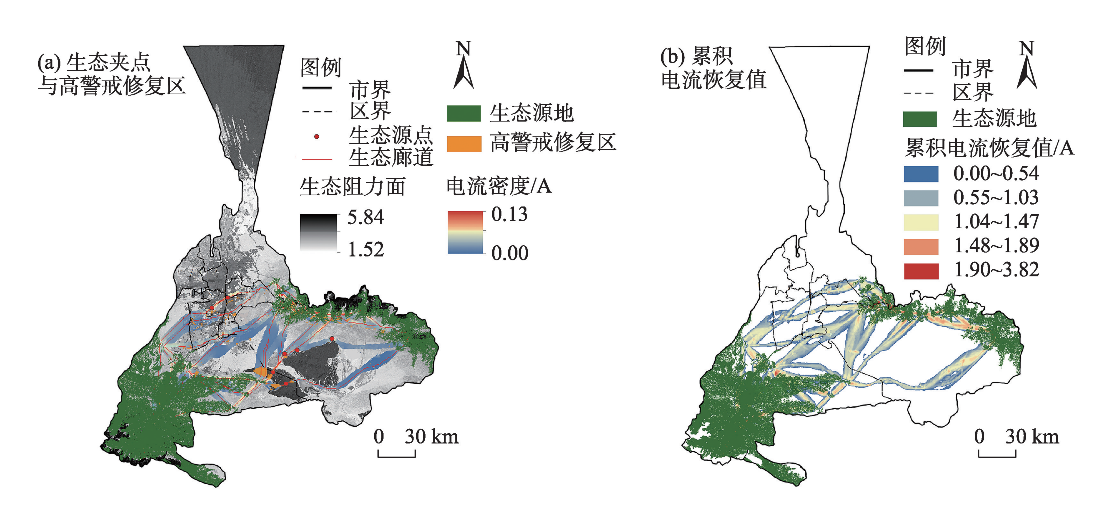


图7 生态夹点与高警戒修复区空间分布

Fig. 7 Spatial distributions of ecological pinch points and high alert restoration areas

城市建设用地或需要穿过建设用地的交通廊道，其周围会受到一定程度的破坏和干扰，使得廊道之间的连通程度较低，基于此需要对廊道采用相关技术进行人为修复，种植城市原有的能够适应区域生态特征的植被，提高与周围环境的融合程度。

（3）对于生态空间而言，要优化土地利用规划布局。宏观层面，可划分山地森林生态保护区、山前丘陵森林草地生态敏感区、绿洲农业生态建设区、荒漠沙漠生态恢复区"四区"，对其中土地破坏、荒漠化严重地区开展土地整治工作。例如在研究区南部和东部天山的低山和前山等水土流失较为严重的区域，设置禁牧、禁采区，并加大区域生态修复；包括加强对乌鲁木齐河、一号冰川区域的环境综合保护；同时大力实施东道海子、柴窝堡湖等湿地保护与恢复工程。微观城市建设层面，要在严格划定"三条红线"的基础上制定乌鲁木齐市国土空间规划，将城市不同区域按重点开发区、适度开发区、生态保护区和禁止开发区分为4个等级，为未来城市发展的方向奠定基础。同时，打造好围绕中心城区周边的环型生态绿化屏障。

4 讨论

本研究以典型干旱区绿洲城市构建生态安全格局，拓展了多以大城市群为研究对象的局限，提出了一个适用于小尺度的生态安全格局构建方法。研究表明，在《乌鲁木齐市城市总体规划(2000—2020年)》中，强调对生态保护红线核心区实施严格管控，鼓励保护农田和生态用地，加强绿化用地管理，以更好地调节与改善市域内生态环境，从而使得近20 a间，研究区生态源地面积得以不断增加，这与哈力木拉提·阿布来提等[19]的研究结果具有一致性。

在生态安全格局的时间发展变化上，付万年等[28]研究结果表明，无论是在数量还是质量上，2020年乌鲁木齐市耕地占补平衡与生态因素整体均有稳步提升，生态安全格局各项指标已提升至安全或十分安全状态，这与本次研究结果也较为吻合。

国土空间生态修复是落实生态文明建设战略的重要举措。科学识别国土空间生态修复关键区域，合理布局全域生态修复空间是当前国土空间规划面临的难点之一。但生态系统是一个有机生命系统，单一要素、单一手段的土地整治与生态修复模式已难以完全解决综合问题，需要从生态系统的整体性、综合性出发，由单要素单目标整治修复转向整个国土空间系统修复和治理。而生态安全格局充分考虑了国土空间的系统性和景观组分间的关联性，本文在实现了生态廊道由"线"转"面"的基础上，还实现了生态廊道宽度及"补丁"(生态修复区域)大小的定量化，使得基于生态安全格局识别待修复生态区域也更具生态学价值，也打破了以往只针对单一对象进行整治修复的局限，为实现"山水林田湖草"整体保护、系统修复、综合治理提供了新的参考。但是，本文在对研究区生态系统服务功能和生态敏感性评价时，指标的选取带有一定的主观性，使得研究结果可能存在一定的误差，需在今后不断完善指标体系及对相关参数的修正。同时，还需进一步建立对生态系统结构优化和功能连通性提升程度的量化测度标准，以提高本研究的科学精确性。

5 结论

基于生态系统服务功能和生态敏感性评价，结合MCR模型和电路理论，对生态源地、廊道、夹点及整体生态安全格局进行了构建，并识别出了高警戒生态修复区，主要结论如下：

（1）20 a间，研究区生态源地面积不断增加，共增加面积445.63 km^2，占比增至22.13%。空间上呈现大致东西分布的"两核"模式，即主要集中在研究区东部的达坂城区和西南部边缘的乌鲁木齐县，这些区域同时也是生态系统服务极重要区和生态极敏感区，需要重点保护。

（2）2000、2010年和2020年研究区生态廊道总数分别为27条、30条和40条，总长度分别为870.42 km、1115.83 km、1277.12 km，生态网络连接水平不断提升，物种在源地之间的迁徙与能量的流动的效率不断提升。

（3）20 a间，研究区5个等级生态安全空间分布具有不均衡性。高生态安全空间集中分布于研究区东北部和西南部，较高生态安全空间集中分布于高生态安全空间外围，且相对集中于中部，二者空间分布呈持续扩张趋势。中等生态安全的空间分布呈西北—东南走向条带状，且集中于研究区中部

较高生态安全空间外围。较低态安全空间集中分布于研究区西北部及东南部，低生态安全空间则主要集中分布于北部，且在南部有较少分布，三者空间分布呈不断减少趋势。

（4）确定研究区生态夹点7个，与生态廊道的连通性较好，研究区虽已形成源地间“点-线-面”的生态网络格局，但须做好进一步的改善和保护。

（5）识别高警戒修复区188.17 km^2，流经区域累积电流值恢复区间为0.55~1.47 A，修复后累积电流最大值由4.75 A降至3.82 A。高警戒修复区的改善，对提升生态源地间的连通性及生态安全格局优化具有积极作用。

参考文献（References）

[1] 李航鹤, 马腾辉, 王坤, 等. 基于最小累积阻力模型(MCR)和空间主成分分析法(SPCA)的沛县北部生态安全格局构建研究[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(8): 1036−1045. [Li Hanghe, Ma Tenghui, Wang Kun, et al. Construction of ecological security pattern in northern Peixian based on MCR and SPCA[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(8): 1036−1045.]

[2] 王根绪, 程国栋, 钱鞠. 生态安全评价研究中的若干问题[J]. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1551−1556. [Wang Genxu, Cheng Guodong, Qian Ju. Several problems in ecological security assessment research[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(9): 1551−1556.]

[3] 朱强, 俞孔坚, 李迪华. 景观规划中的生态廊道宽度[J]. 生态学报, 2005, 35(9): 2406−2412. [Zhu Qiang, Yu Kongjian, Li Dihua. The width of ecological corridor in landscape planning[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 35(9): 2406−2412.]

[4] 何子张, 施艳琦, 林云萍, 等. 面向规划统筹的厦门国土空间生态修复规划探索[J]. 规划师, 2020, 36(17): 13−19. [He Zizhang, Shi Yanqi, Lin Yunping, et al. Planning integration oriented Xiamen land and space ecological restoration planning[J]. Planners, 2020, 36(17): 13−19.]

[5] Yu K J. Security patterns and surface model in landscape ecological planning[J]. Landscape & Urban Planning, 1996, 36(1): 1−17.

[6] 蒙吉军, 燕群, 向芸芸. 鄂尔多斯土地利用生态安全格局优化及方案评价[J]. 中国沙漠, 2014, 34(2): 590−596. [Meng Jijun, Yan Qun, Xiang Yunyun. The optimization of ecological security pattern based on land use and assessment of schemes in Ordos, Inner Mongolia, China[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(2): 590−596.]

[7] 薛强, 路路, 牛韧, 等. 基于地质灾害敏感性的生态安全格局关键区识别与修复——以济南市为例[J]. 生态学报, 2021, 41(22): 9050−9063. [Xue Qiang, Lu Lu, Niu Ren, et al. Identification and restoration of key areas of ecological security pattern based on sensitivity to geological disasters: A case study of Jinan City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(22): 9050−9063.]

[8] 付凤杰, 刘珍环, 刘海. 基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别——以贺州市为例[J]. 生态学报, 2021, 41(9): 3406−3414. [Fu Fengjie, Liu Zhenhuan, Liu Hai. Identifying key areas of ecosystem restoration for territorial space based on ecological security pattern: A case study in Hezhou City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9): 3406−3414.]

[9] 刘顺鑫, 黄云. “三生空间”视角下万州区景观生态安全评价及其耦合特征分析[J]. 水土保持研究, 2020, 27(6): 308−316. [Liu Shunxin, Huang Yun. Valuation and coupling coordination analysis of landscape ecological security of Wanzhou district from the perspective of production-life-ecological space[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(6): 308−316.]

[10] 刘晓阳, 曾坚, 贾梦圆, 等. 闽三角城市群生态安全格局构建及城镇扩展模拟[J]. 生态学报, 2020, 40(21): 7873−7885. [Liu Xiaoyang, Zeng Jian, Jia Mengyuan, et al. Construction of ecological security pattern and simulation of urban sprawl in the urban agglomeration of Min Delta[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(21): 7873−7885.]

[11] 吴金华, 刘思雨, 白帅. 基于景观生态安全的神木市生态廊道识别与优化[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1120−1127. [Wu Jinhua, Liu Siyu, Bai Shuai. Identification and optimization of ecological corridors in Shenmu City based on landscape ecological security[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 1120−1127.]

[12] 张学渊, 魏伟, 颉斌斌, 等. 西北干旱区生态承载力监测及安全格局构建[J]. 自然资源学报, 2019, 34(11): 2389−2402. [Zhang Xueyuan, Wei Wei, Xie Binbin, et al. Ecological carrying capacity monitoring and security pattern construction in arid areas of northwest China[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(11): 2389−2402.]

[13] 马才学, 杨蓉萱, 柯新利, 等. 基于生态压力视角的长三角地区生态安全格局构建与优化[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(1): 135−147. [Ma Caixue, Yang Rongxuan, Ke Xinli, et al. Construction and optimization of ecological security pattern in Yangtze River Delta based on the perspective of ecological pressure[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(1): 135−147.]

[14] 李鹏辉, 徐丽萍, 刘笑, 等. 基于三维生态足迹模型的天山北麓绿洲生态安全评价[J]. 干旱区研究, 2020, 37(5): 1337−1345. [Li Penghui, Xu Liping, Liu Xiao, et al. Ecological security evaluation of an oasis in the north of the Tianshan Mountains based on three-dimensional ecological footprint model[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(5): 1337−1345.]

[15] 杨雪荻, 白永平, 车磊, 等. 甘肃省生态安全时空演变特征及影响因素解析[J]. 生态学报, 2020, 40(14): 4785−4793. [Yang Xuedi, Bai Yongping, Che Lei, et al. Spatio-temporal evolution and influencing factors of ecological security pattern in Gansu Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(14): 4785−4793.]

[16] 董嫒嫒. 基于“生态要素-DPSIRM”生态安全评价体系的构建

[J]. 水土保持研究, 2020, 27(5): 333-339. [Dong Yuanyuan. Construction of ecological safety evaluation system based on 'ecological elements: DPSIRM'[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(5): 333-339.]

[17] 雷金睿, 陈宗铸, 陈毅青, 等. 1990—2018年海南岛湿地景观生态安全格局演变[J]. 生态环境学报, 2020, 29(2): 293-302. [Lei Jinrui, Chen Zongzhu, Chen Yiqing, et al. Dynamic analysis of wetland landscape ecological security pattern of Hainan Island in 1990—2018[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(2): 293-302.]

[18] 张瑾青, 罗涛, 徐敏, 等. 闽三角地区城镇空间扩张对区域生态安全格局的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(15): 5113-5123. [Zhang Jinqing, Luo Tao, Xu Min, et al. Influence of urban spatial expansion on the regionally ecological security pattern in Min-Delta region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(15): 5113-5123.]

[19] 哈力木拉提·阿布来提, 阿里木江·卡斯木, 祖拜旦·阿克木. 基于形态学空间格局分析法和MCR模型的乌鲁木齐市生态网络构建[J]. 中国水土保持科学, 2021, 19(5): 106-114. [Abulaiti Halimulati, Kasimu Alimujiang, Akemu Zubaidan. Construction and optimization of Urumqi ecological network based on the morphological spatial pattern analysis and MCR model[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, 19(5): 106-114.]

[20] 王珊珊, 毋兆鹏. 基于生态安全的乌鲁木齐市土地利用冲突识别[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(1): 46-53. [Wang Shanshan, Wu Zhaopeng. Identification of land use conflicts based on ecological security in Urumqi City[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2022, 61(1): 46-53.]

[21] 林晋大, 多玲花, 邹自力. 城市扩张背景下景观破碎化动态演变及空间自相关分析——以南昌市为例[J]. 水土保持研究, 2022, 29(4): 362-369. [Lin Jinda, Duo Linghua, Zou Zili. Dynamic evolution and spatial autocorrelation analysis of landscape fragmentation under the background of urban expansion: A case study of Nanchang City[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(4): 362-369.]

[22] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning[J]. Landscape and Urban Planning, 1992, 23(1): 1-16.

[23] McRae B H, Dickson B G, Keitt T H, et al. Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation[J]. Ecology, 2008, 10: 2712-2724.

[24] 郑群明, 申明智, 钟林生. 普达措国家公园生态安全格局构建[J]. 生态学报, 2021, 41(3): 874-885. [Zheng Qunming, Shen Mingzhi, Zhong Linsheng. Construction of ecological security pattern in Pudacuo National Park[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(3): 874-885.]

[25] 张萌, 刘吉平, 赵丹丹. 吉林省西部生态安全格局构建[J]. 干旱区地理, 2021, 44(6): 1676-1685. [Zhang Meng, Liu Jiping, Zhao Dandan. Construction of ecological security pattern in western Jilin Province[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(6): 1676-1685.]

[26] Wang G, Cheng G, Ju Q. Several problems in ecological security assessment research[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(9): 1551-1556.

[27] 王晓峰, 吕一河, 傅伯杰. 生态系统服务与生态安全[J]. 自然杂志, 2012, 34(5): 273-276, 298. [Wang Xiaofeng, Lü Yihe, Fu Bojie. Ecosystem services and ecological security[J]. Chinese Journal of Nature, 2012, 34(5): 273-276, 298.]

[28] 付万年, 蒲春玲, 刘金芝, 等. 乌鲁木齐市耕地占补平衡生态安全评价[J]. 西南农业学报, 2018, 31(12): 2624-2629. [Fu Wannian, Pu Chunling, Liu Jinzhi, et al. Evaluation of eco-security of cultivated land requisition-compensation balance in Urumqi[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018, 31(12): 2624-2629.]

Construction of ecological security pattern in Urumqi based on multi-temporal remote sensing data

TIAN Liulan[1], WANG Shanshan[2], WU Zhaopeng[1,3]

(1. School of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, Xinjiang, China; 2. Secondary Art School Affiliated to Xinjiang University of the Arts, Urumqi 830023, Xinjiang, China; 3. Xinjiang Laboratory of Arid Lake Environment and Resources, Urumqi 830054, Xinjiang, China)

Abstract: An ecological security pattern can promote regional ecological development and be highly beneficial for preserving ecologically fragile areas. Urumqi of Xinjiang, China, is a typical oasis city in an arid area. In an era of rapid development of industrialization and urbanization, because of the topographical and geological limitations and uneven spatial distribution of water and soil resources, the trade-off between regional agricultural development, ecological protection, and urbanization development is a concern. Therefore, the development of an effective method for the analysis of the temporal and spatial evolution of ecological security patterns is critical. In this study, the principle of "ecological source identification-resistance surface construction-ecological corridor extraction" was used. Based on these factors and the evaluation of the importance of ecosystem services and ecological sensitivity, the land use data of Urumqi in 2000, 2010, and 2020 were used to identify the ecological source. Next, the ecological corridors were extracted using the minimum cumulative resistance model. Furthermore, ecological pinch points were determined using the circuit theory. Finally, the resistance threshold method was used to develop the ecological security space and define the high alert restoration area. The results revealed the following: (1) In recent 20 years, the area of ecological source areas has increased considerably, and its area of 445.63 km^2 was more than 3.19% of the study area. The newly increased ecological source areas were distributed in Urumqi County and Dabancheng District in the southwest and east of the study area. (2) In the three periods, 27, 30, and 40 ecological corridors with a total length of 870.42 km, 1115.83 km, and 1277.12 km, respectively, were identified. (3) The spatial distribution of the five levels of ecological security in the study area was uneven. The northeast, southwest, and periphery regions of the study area had a concentration of high ecological security spaces, whereas the middle region had a moderate concentration. The two spatial distributions revealed a continuous expansion trend. The medium ecological security space showed zonal distribution from northwest to southeast in the study area, whereas low ecological security space was concentrated in the north and sparse in the south. The spatial distribution of the three space types exhibited a decreasing trend. (4) Seven ecological pinch points were observed in the study area. The areas of high alert repaired were 188.17 km^2. The maximum accumulated current was reduced from 4.75 A to 3.82 A after restoration. The results can effectively coordinate the contradictory relationship between economic development and ecological protection in the study area. The results of the study can provide a scientific foundation and support the territory development plan for optimizing ecological civilization construction.

Key words: multi-temporal remote sensing data; minimum cumulative resistance model; circuit theory; ecological security pattern; Urumqi City